第47卷 第10期
2024年10月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 10
Oct. 2024

黄河流域三大城市群城市韧性空间网络结构研究

史维良， 李博雅

（西安财经大学统计学院，陕西 西安 710100）

摘 要：在风险复杂化与区域协同化的背景下，探讨多中心、多层级、多节点的韧性空间网络结构组织模式对城市群韧性建设、风险防范及可持续发展具有现实意义。基于社会网络理论，以黄河流域三大城市群为例，运用修正后的引力模型测算城市韧性发展空间关联关系，在此基础上利用社会网络分析黄河流域三大城市群韧性空间关联网络的结构特征。结果表明：(1) 黄河流域三大城市群城市韧性水平呈现增长势态，韧性网络联系强度逐渐增强，韧性整体网络日趋完善。(2) 黄河流域三大城市群韧性水平空间联系网络日益紧密，省会城市辐射效应明显，优势地位突出，但子群间发展不均衡。黄河流域三大城市群已形成典型网络式空间格局，其中山东半岛城市群形成以省会济南市为中心出发点，以沿海城市青岛市、烟台市为次级中心点辐射带动整个城市群的"一主二副"韧性空间网络格局；中原城市群形成以郑州为中心，外围的开封市、洛阳市等城市为次级中心点的"放射状"韧性空间网络格局；关中平原城市群韧性联系密切区域主要呈现以省会西安市和咸阳市相连接的"双核"韧性空间网络格局。

关 键 词：城市韧性；空间网络结构；引力模型；社会网络分析

文章编号：1000－6060(2024)10－1767－14(1767～1780)

第七次全国人口普查数据显示，我国城镇化率已接近64%，预计到2035年，这一比例将达到70%以上，我国目前正经历着历史上前所未有的城市化进程。大量人口、信息、资源等要素的集聚及要素间存在的关联性、流动性和交互性，带来了诸如经济危机、公共卫生事件等突发风险，以及生态环境、公共安全等慢性累计风险的各类风险。在风险复杂化与区域协同化的背景下，传统的防灾理念已经不能满足城市应对不确定性问题的需求，韧性理念随着国际减灾实践的推进逐步被引用到城市规划中。在"中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划"中，首次将韧性城市建设作为国家战略规划被提出，提倡"建设韧性城市，提高城市治理水平，加强特大城市治理中的风险防控"；2022年，党的二十大报告提出"实施城市更新行动，加强城市基础设施建设，打造宜居、韧性、智慧城市"。在新的时代背景下，面对各种不确定因素，韧性城市的发展与构建是必不可少的。区域协同引领城市群向网络化转型，城市韧性研究也逐渐向网络化扩展。在网络型城市群与韧性城市建设迈入新时期的背景下，探讨多中心、多层级、多节点的韧性空间组织模式，是实现未来城市与城市群韧性空间发展的关键议题之一。黄河流域高质量发展是重大国家发展战略，黄河流域三大城市群（即山东半岛城市群、中原城市群、关中平原城市群）作为黄河流域重要组成部分，目前存在抵御风险能力不足、恢复能力弱等特点，制约该区域的区域联动与可持续发展，而韧性建设可以提升城市群对灾害的承受能力，使得区域更好应对灾害和风险。因此，探究黄河流域三大城市群的韧性水平和韧性网络结构，这对于促进黄河流域城市群的高质量发展具有一定的实践意义。

收稿日期：2024-01-25； **修订日期**：2024-04-07

基金项目：国家哲学社会科学基金重大项目(21&ZD147)；国家哲学社会科学基金重点项目(20ATJ002)；陕西省社会科学基金项目(2020F003)资助

作者简介：史维良(1973-)，女，硕士，副教授，主要从事应用统计与风险管理等方面的研究. E-mail: 1836160272@163.com

通讯作者：李博雅(1998-)，女，硕士研究生，主要从事应用统计与自然灾害风险管理等方面的研究. E-mail: bylkkkk@163.com

回顾现有文献，对城市韧性的研究主要在于韧性的定义与指标体系构建方面。关于韧性定义，韧性最早被应用到生态学的研究当中，后学者逐渐将概念进行拓展到多领域。最初国外学者Alberti等[1]定义韧性是随着城市发展的内外驱动力改变后，城市依然可以保持原有的结构与发展的能力。之后洛克菲勒基金协会[2-3]将其定义为在面对压力时，城市中个人、社区、机构的延续发展的能力。关于韧性城市评价体系的研究，一是以城市基本组成要素为核心[4-7]，城市作为一个集社会、经济、生态等多维元素为一体的系统，其核心内容成为主要的评估与度量。二是以韧性城市特征为核心的体系[8-10]，以韧性城市特征出发的评价体系最早关注坚固性和快速性特征，后逐步引入冗余性和智慧性特征。三是韧性阶段过程为核心的体系[11-12]，城市韧性建设是动态的过程，大致可以分为抵抗、恢复和适应3个阶段。研究视角多集中在省域及国内大型发展城市群区域[13-15]，其中黄河流域城市为样本的韧性研究，多集中在城市生态、经济韧性的测度，主要探究时空分异特征及影响因素分析等。城市群空间网络结构研究方面[16-17]，近年来空间结构特征的研究主要从单中心发展至出现明显多中心、网络化的空间结构特征，相应的研究开始从城市个体联系度转变成对城市群整体网络演化特征的探索。城市韧性与城市空间网络结构相结合的研究主要是从关联网络视角测度城市网络的结构韧性能力，强调城市网络韧性的空间特性[18-21]，城市群网络韧性作为韧性在城市网络体系演化中的一种拓展与延伸。

通过对文献梳理可知，学者们对城市韧性和城市空间网络分别进行了一定的研究，但目前研究仍存在以下方面不足：首先，现有城市韧性评价指标体系主要是从城市子系统与韧性定义角度两方面来构建指标体系，静态视角分析当前城市的韧性能力，较少从扰动因素发生前后的动态视角探究城市群韧性能力。其次，对于城市韧性的综合性网络分析研究较少。关于城市群韧性空间网络的研究较少考虑网络结构属性特点，多集中于使用泰尔指数、地理探测器等方法探究区域城市韧性发展空间分异特征，较少从空间网络视角出发，引入社会网络分析法，分析各个城市在城市群韧性网络中的地位和作用。最后，对中西部欠发达区域城市群韧性深入研究相对较少。在研究城市群区域选择偏向长江三角洲、京津冀、珠江三角洲等国内大型发展城市群区域，黄河流域地区韧性网络深入研究较少。鉴于此，本研究将社会网络理论与城市韧性研究相结合，运用修正引力模型及社会网络分析法对黄河流域三大城市群韧性空间网络结构特征进行分析，为黄河流域三大城市群韧性建设方向、风险防范及可持续发展提出政策建议。

1 研究区概况

黄河流域指整个黄河水系包括其支流所影响的地理生态区域。黄河流域主要划分为7大城市群，其人口及各经济指标占黄河流域的85%~96%。其中，黄河流域三大城市群的人口及各经济指标占黄河流域所有城市群的77%~89%，占黄河流域的73%~83%，是黄河流域发展的重点区，以黄河流域区级三大城市群为主要抓手，推动黄河流域整体韧性发展是十分必要的。因此，将山东半岛城市群、关中平原城市群、中原城市群3个区级城市群做为研究对象数据(图1)。

2 数据与方法

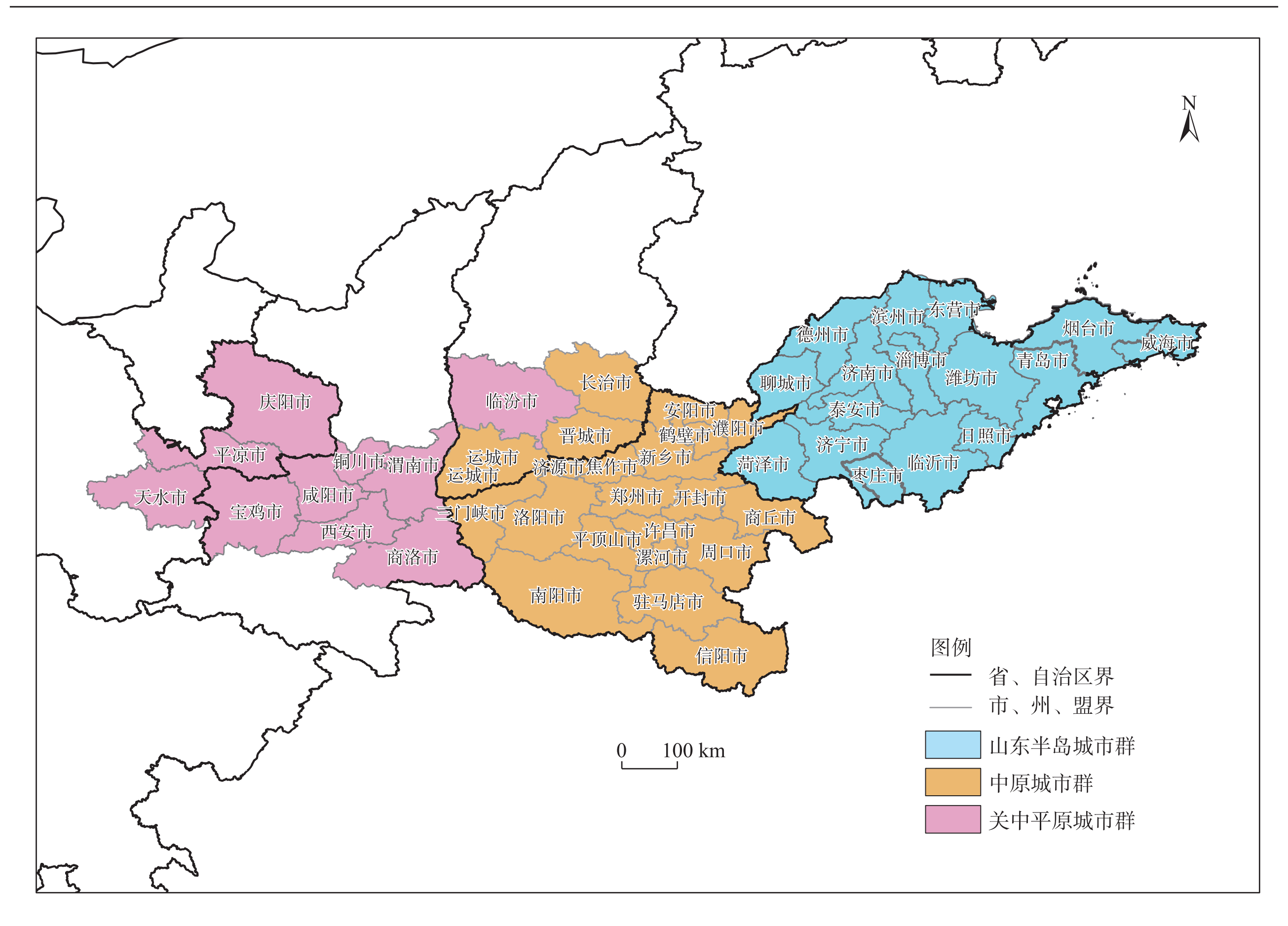
2.1 数据来源

数据来源基于国家政府机构的权威数据，具体数据来源于2012—2021年《中国统计年鉴》《中国旅游统计年鉴》《国民经济和社会发展公报》《中国环境统计年鉴》各省统计年鉴等，具有一定科学性与实用性。

2.2 DPSR模型及指标体系构建

城市韧性指城市在面对干扰时，能够充分调动和利用经济、社会、组织、生态、基础设施等各类要素，广泛动员城市中的个体、社区、社会组织、政府等多方力量，共同展现出预防、抵抗、恢复、学习、适应和转化等多重应对能力。通过文献梳理[21-23]，韧性特性中反思性和响应性均强调城市危机学习和应急响应的能力；灵活性、冗余性和鲁棒性指城市拥有能够抵御风险的系统和资源，以及通过备选方案促进恢复的能力；包容性和集成性则涉及善治和有效治理的过程。

近年来，由于各种自然灾害或社会事件的频发，一些学者探究PSR模型在灾害风险治理和城市韧性研究的适用性[24-25]，DPSR(驱动力-压力-状态-



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。下同。

图1　黄河流域三大城市群研究区位图

Fig. 1　Location map of the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin

响应)将系统发展核心的驱动力引入框架，提升系统的动态逻辑性。本文在构建韧性指标评价体系时，运用DPSR模型思维，从因果链的四大力量“驱动力→压力→状态→响应”动态地、联系地来分析研究城市受到扰动，韧性发挥作用的过程。具体来看，随着城市化和社会经济水平不断提升，以生态资源、科技创新、城市化等因素为城市群发展的长期驱动力，对资源环境和经济社会发展产生压力，这些压力扰动使得城市系统的状态做出反应，再到扰动后人类对城市灾害风险的变化做出响应，采取措施提升城市韧性能力，增强城市抵抗风险的能力。该模型从动态的角度分析经济、社会、环境、政策等各要素之间的内在联系。城市韧性评价系统如图2所示。

具体来看，驱动力主要指推动城市韧性提升的主要动力因素，表征着能够促使韧性系统发生转变的隐性因素，主要考虑经济发展与社会发展2个层面的驱动作用；压力指各种经济和社会的驱动力对城市韧性水平建设施加压力的要素，同时也是促使韧性系统发生变化的显性因素；状态指在驱动力与压力的综合影响下城市目前呈现出的现状，体现韧性的灵活性、冗余性和鲁棒性，状态指标主要指经济社会、生态资源状况和基础设施建设；响应是针对驱动力和压力的影响而采取的必要措施，体现韧性的集成性和反思性，从抵抗、恢复、适应三方面进行诠释，这是城市韧性建立的主要阶段。考虑到城市韧性内涵以及学者的研究成果[21-29]，根据指标科学性、客观性、独立性和可获性等原则，基于DPSR模型构建了黄河流域城市群韧性评价指标体系，如表1所示。

2.3　TOPSIS熵权法

熵权法是一种客观赋权方法，熵权法根据样本的数据分布决定指标权重，为多指标综合评价提供依据，TOPSIS方法能够充分利用数据信息，全面且

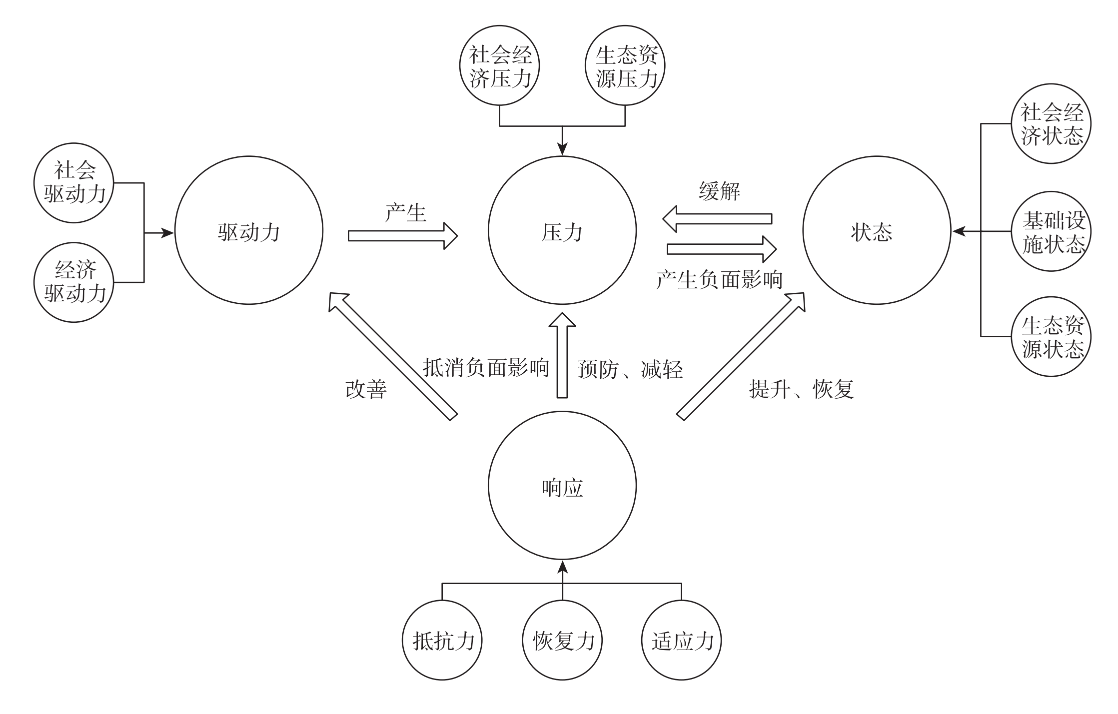


图2 城市韧性评价系统DPSR模型

Fig. 2 DPSR model of urban resilience evaluation system

客观地展现各个评估指标间的差异。将2种方法进行结合,用熵值法确定权重,TOPSIS法确定各个指标的得分情况并进行排序。

(1) 将各指标的数据进行标准化处理。如果有m个评价单元,给出了n个指标值,设x_{ij}为第$i(i=1,2,\cdots,m)$个评价单元中第$j(j=1,2,\cdots,n)$项指标值,则有:

正向指标: $y_{ij}=(x_{ij}-x_j\min)/(x_j\max-x_j\min)+1$ (1)

负向指标: $y_{ij}=(x_j\max-x_{ij})/(x_j\max-x_j\min)+1$ (2)

式中:y_{ij}为标准化后的指标值;x_{ij}为第i个指标在第j个指标上的观测数值;$x_j\min$和$x_j\max$分别为第j项指标的最小值和最大值。

(2) 计算第i个指标在第j个指标上的比值p_{ij}:

$$p_{ij}=y_{ij}/\sum_{i=1}^{n}y_{ij} \quad (3)$$

(3) 计算第j个指标的熵值e_j:

$$e_j=-1/\ln n\sum_{i=1}^{n}p_{ij}\ln(p_{ij}),\quad 0\leqslant e_j\leqslant 1 \quad (4)$$

(4) 确定指标的权重w_j:

$$w_j=\left(1-e_j\right)/\sum_{i=1}^{n}\left(1-e_j\right),\quad j=1,2,\cdots,m \quad (5)$$

(5) 构造加权后的规范化矩阵Z,其中w_j为采用熵值法确定的各指标权重:

$$Z=(w_j y_{ij})_{m\times n} \quad (6)$$

(6) 矩阵中的最大值Z^+和最小值Z^-:

$$Z^+=(Z_1^+,Z_2^+,\cdots,Z_m^+),\ Z^-=(Z_1^-,Z_2^-,\cdots,Z_m^-) \quad (7)$$

(7) 评价对象的最大距离D_i^+和最小距离D_i^-:

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Z_j^+-z_{ij})^2}$$
$$D_i^-=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Z_j^--z_{ij})^2} \quad (8)$$

(8) 指标的最终得分情况(评价指数)S:

$$S=D_i^-/(D_i^++D_i^-) \quad (9)$$

2.4 修正引力模型

为能准确客观反映城市间韧性联系强度水平,对传统引力模型的质量进行修正,在城市韧性发展体系的基础上运用熵值法计算各个城市的韧性发展综合得分,将综合得分作为城市质量,修正后的城市韧性模型如下所示:

修正后城市韧性强度计算公式为:

$$G_{ij}=k(M_iM_j/d_{ij}{}^2),\ k_{ij}=M_i/M_j \quad (10)$$

式中:G_{ij}为城市i对城市j的城市韧性发展引力;M_i、M_j分别为城市i对城市j的城市韧性发展"质量";$d_{ij}{}^2$为两城市间的地理距离;k_{ij}为城市i对城市j的城市韧性贡献率。

表1 基于DPSR模型的城市韧性评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of urban resilience based on DPSR model

一级指标	二级指标	三级指标	描述与说明
驱动力	经济发展驱动力	GDP增长率(+)	经济活力
		第三产业增加值(+)	产业结构
		固定资产投资增长率(+)	生产要素保障
		国内外3种专利授权数(+)	技术进步
	社会发展驱动力	城镇化率(+)	社会进步水平和经济发展水平
		人口增长率(+)	社会经济增长的基本要素
		城镇居民人均可支配收入(+)	居民消费驱动力
		一般公共预算支出(+)	社会发展驱动力
压力	经济社会压力	失业率(−)	就业风险
		外贸依存度(−)	外部安全风险
		人口密度(−)	人口压力
	生态资源压力	SO_2排放(−)	环境污染及能源压力
		废气排放(−)	
		单位生产总值能耗(−)	
状态	城市环境资源状态	城市人均园林绿地面积(+)	城市基础生态状况
		空气质量优良天数比例(+)	
		城市用水普及率(+)	城市能源使用情况
		燃气普及率(+)	
	城市经济社会状态	职工平均工资(+)	社会状态
		城市恩格尔系数(+)	
		人均GDP(+)	经济状态
		政府财政收入增长率(+)	
	城市基础设施状态	建成区排水管道密度(+)	排水情况
		人均城市道路面积(+)	道路交通状况
响应	抵抗、恢复能力	互联网普及程度(+)	预警与救援能力
		千人拥有的卫生机构病床数(+)	
		社会保障占公共预算支出比例(+)	
		人均金融机构存款(+)	
		污水处理率(+)	污染治理能力
		生活垃圾无害处理率(+)	
	适应响应	科学教育事业投入占GDP比重指标(+)	经济创新
		城市市政公用设施建设固定资产投资完成额指标(+)	基础设施
		居民年末储蓄余额(+)	社会提升

2.5 社会网络分析法

社交网络模型以"点"为研究对象，通过"点"以及它们之间基于特定关系形成的"线"来构建一张网络图。与其他量化分析方法相比，社交网络分析在准确刻画网络中的各种关系方面具有显著优势，并且能够有效反映出整个网络结构的总体特性以及个体在网络中所处的位置。本研究城市群韧性关系网络，将各个城市的韧性水平视为点，它们之间的相互作用关系视为线，主要从整体网络、个体网络和空间块模型3个角度，分析三大城市群韧性网络中各个城市的位置关系及其关联网络结构特征。

3 结果与分析

3.1 黄河流域三大城市群韧性总体发展演进趋势分析

基于熵值法对数据进行测算，利用TOPSIS综合评价法对各城市韧性发展状况进行测度评价，得到2012—2021年黄河流域三大城市群的韧性发展水平，如表2所示。黄河流域三大城市群韧性呈现波

表2 2012—2021年黄河流域三大城市群韧性发展趋势

Tab. 2 Resilience development trends of the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin from 2012 to 2021

城市群	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年	2021年	增幅	增速
山东半岛城市群	0.266	0.274	0.279	0.291	0.306	0.320	0.335	0.348	0.372	0.419	0.123	0.575
中原城市群	0.214	0.220	0.223	0.234	0.247	0.270	0.288	0.297	0.313	0.329	0.108	0.450
关中平原城市群	0.218	0.223	0.223	0.229	0.239	0.242	0.254	0.265	0.277	0.297	0.078	0.282

动上升趋势，各城市群韧性水平增长趋势较为明显，增长幅度大体保持同步，但存在不均衡现象，城市群整体韧性发展水平形成“中低、东高”的空间分布格局。

3.2 黄河流域三大城市群韧性空间网络结构分析

3.2.1 黄河流域三大城市群韧性联系强度分析 基于修正引力模型计算2012—2021年黄河流域三大城市群韧性发展水平的引力矩阵，得出各城市群空间网络联系强度总量，为了清楚展示各个城市群内部韧性联系强度关系，将得到的联系强度总量借助ArcGIS软件的自然断点法把联系强度划分为4个等级，选取2012、2021年的时间截面绘制城市群韧性水平空间网络联系强度(图3)。

总体来看，(1) 黄河流域三大城市群韧性联系网络的密度和联系强度均呈增长态势，韧性联系日趋强化和紧密，资源要素传递日趋频繁，且韧性联系强度高值轴线的空间分布演变格局较为稳定，大体上形成了以韧性联系强度高值地区逐渐向周边城市辐射的空间集聚区，并逐步形成较为密集复杂的网络分布格局。(2) 黄河流域三大城市群韧性联系强度的地区差异极为显著，较高韧性联系强度主要在群内核心城市之间，省会及副省级中心城市与其周边地市间韧性联系较强，与较远地市的韧性联系强度较弱。(3) 山东半岛城市群形成以省会济南市为中心出发点，以沿海城市青岛市、烟台市为次级中心点辐射带动整个城市群的“一主二副”的韧性联系空间网络格局；中原城市群形成以郑州为中心，外围的开封市、洛阳市等城市为次级中心点的“放射状”城市韧性空间网络格局；关中平原城市群韧性联系密切区域主要呈现以省会西安市和咸阳市相连接的“双核”韧性空间网络结构。

3.2.2 黄河流域三大城市群整体网络结构特征分析 网络密度可以用来揭示整个网络的结构特征，网络密度越大，网络内各节点间的连线越多，网络内各成员间的关系越紧密。利用UCINET软件，将2012—2021年通过转化后的二值矩阵借助社会网络分析工具得到黄河流域三大城市群及各城市群韧性联系的网络密度及网络关系数(表3)。

通过黄河流域各城市群内部韧性联系的网络密度结果来看，各城市群2012年和2021年网络密度大小均呈现“中原城市群>山东半岛城市群>关中平原城市群”的分异格局。

具体来看，2012—2021年山东半岛城市群的网络密度由0.217上升0.233，山东半岛城市群韧性联系越发紧密，网络结构逐渐向稳定的趋势发展。在城市群发展计划制定后，各节点之间的韧性联系更加密集，同时各类多样化的资本、信息、人员等经济要素资源在地域内的分配效率提高，城市群内韧性联系加强；中原城市群的韧性联系网络密度已由2012年的0.307增长至2021年的0.333，成为三大城市群中网络密度提升速度最快的城市群，联系网络日趋复杂化，各成员城市的韧性联系愈强，并由此产生更多区域资源聚集现象的形成；关中平原城市群由2012年的0.136下降至2021年的0.118，网络密度在10 a间有所下降，一方面由于关中平原城市群由于受地理环境因素影响，城市群整体经济社会发展水平相比其他2个城市群较落后，群内城市韧性联系程度较低；另一方面西安作为核心城市，可以有效提高西安市周边城市韧性联系程度，但对于较远地区如庆阳市、运城市等城市辐射带动作用弱。

3.2.3 黄河流域三大城市群个体网络结构特征分析 个体网络结构特征主要是识别在网络中起承接作用的节点，借助度数中心度来进行识别。度数中心度可以直观反映该节点与网络中其他节点发生直接联系的可能性大小，节点的度中心性值越大，则与其他节点联系的可能性越大，该节点对其他节点的控制能力就越强。通过测算出黄河三大城市群韧性空间网络中各节点城市在2012—2021年间的度数中心度数值，并计算各城市韧性度数中心度值位次，从而更直观地反应韧性中心度的变化情

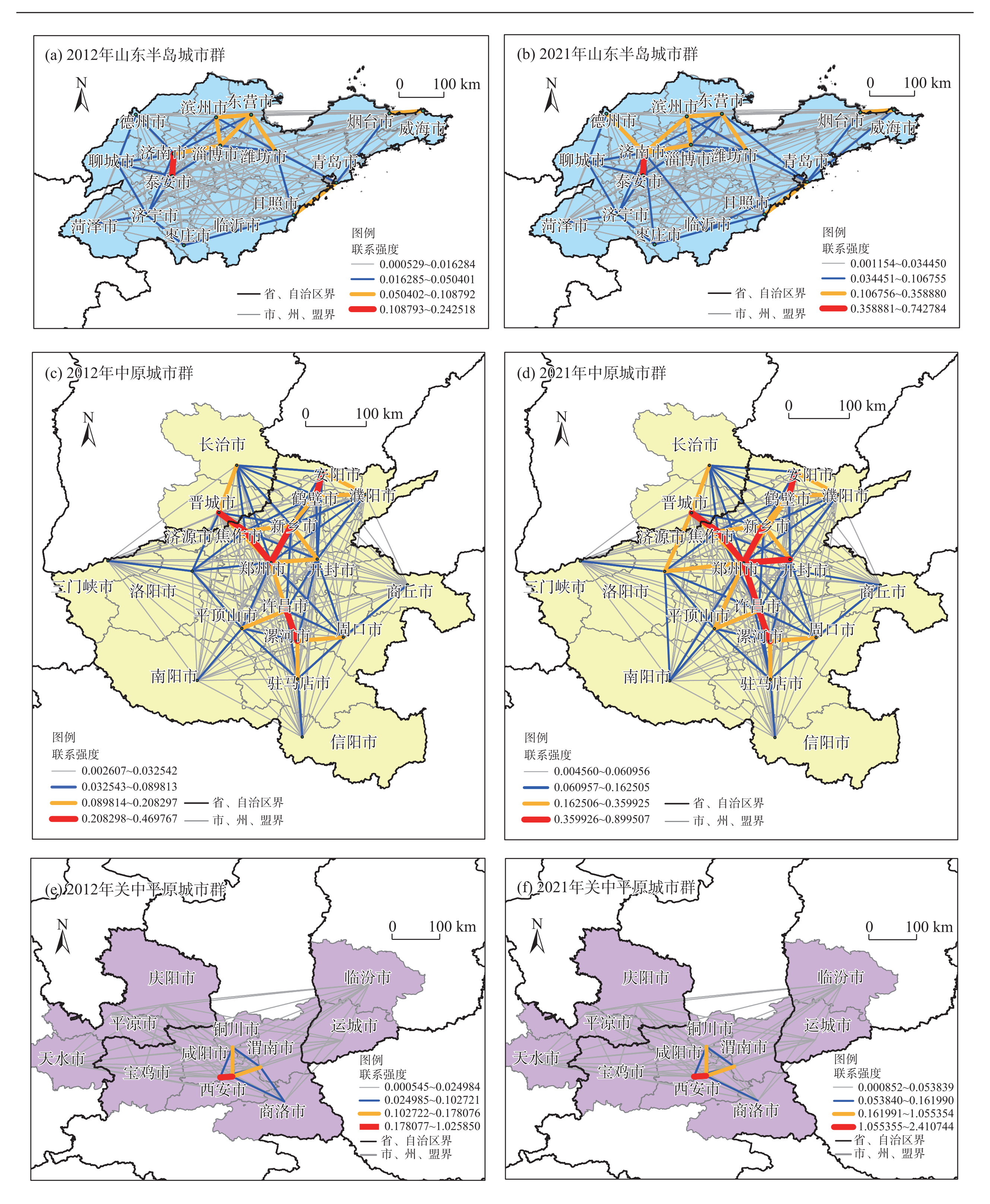


图3　黄河流域三大城市群韧性空间网络联系强度

Fig. 3　Resilience spatial network connection strength of the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin

况，结果如图4所示。

度数中心度整体来看，群内核心城市数量少，而非核心城市数量较多，城市群韧性联系网络目前仍处于发展期。将度数中心度值根据变化情况分为以下三类：

韧性提升型。黄河流域三大城市群中，青岛市、洛阳市、咸阳市的度数中心度涨幅最大，逐渐成为城市群韧性联系网络的重要中心城市，在城市群

表3 网络密度及网络关系数

Tab. 3 Network density and number of network relationships

城市群	2012年		2021年	
	网络密度	网络关系数	网络密度	网络关系数
山东半岛城市群	0.217	52	0.233	56
中原城市群	0.307	105	0.333	114
关中平原城市群	0.136	15	0.118	13
均值	0.220	57	0.228	61

内部的区域影响力逐渐提高。其次东营、临沂市、许昌市、驻马店市、铜川市也有较明显的增幅，这些城市位于中心城市周边，说明随着中原城市群社会经济的稳步推进，此类城市逐渐接收来自核心城市的外溢，逐步由边缘区域向核心区域靠拢，与核心城市间的联系持续增强。

韧性稳定型。黄河流域三大城市群中，济南市、郑州市、西安市处于绝对的核心地位，这些核心城市属于省会城市本身具有较为丰富的资源，表现出良好的风险应对能力；另一方面，这些城市受经济水平、区位条件和创新能力等因素的影响，韧性能力更强，在空间网络的影响力相对较强，与其他城市的合作力度及整体应对风险的能力较强。

韧性下降型。黄河流域三大城市群中，山东半岛城市群下降城市较多，如淄博市、济宁市、日照市等，中原和关中平原城市群下降主要是安阳市和渭南市，说明城市群内下一层级的城市对核心承接不足，网络中由于缺少具有承启作用的次级节点作为缓冲，区域韧性发展不均衡问题凸显。

3.2.4 黄河流域三大城市群空间板块分析 黄河流域三大城市群的发展情境各异，通过探析韧性网络的空间聚类特征，分析由此形成的各板块间的关系，来研究黄河流域三大城市群网络中城市韧性联系的紧密程度。

（1）三大城市群韧性网络板块分类

将黄河流域三大城市群城市之间的韧性联系强度运用块模型进行板块分类。块模型分析是按照关系强弱的标准，将整体韧性网络中相似强弱关系的节点划分为同一板块，成为整体网络的“子网络”，韧性板块分类结果见图5。

2021年三大城市群的各城市在韧性网络中的分布格局具有明显的空间组团特性，各板块内部成员结构趋于稳定。其中山东半岛城市群被划分为以济南为中心的板块一、以滨州市等济南边缘城市的板块二、以沿海城市青岛市为中心的板块三和其余边缘板块四共4个板块。中原城市群被划分为以郑州市为中心的板块一、以开封市为中心的板块

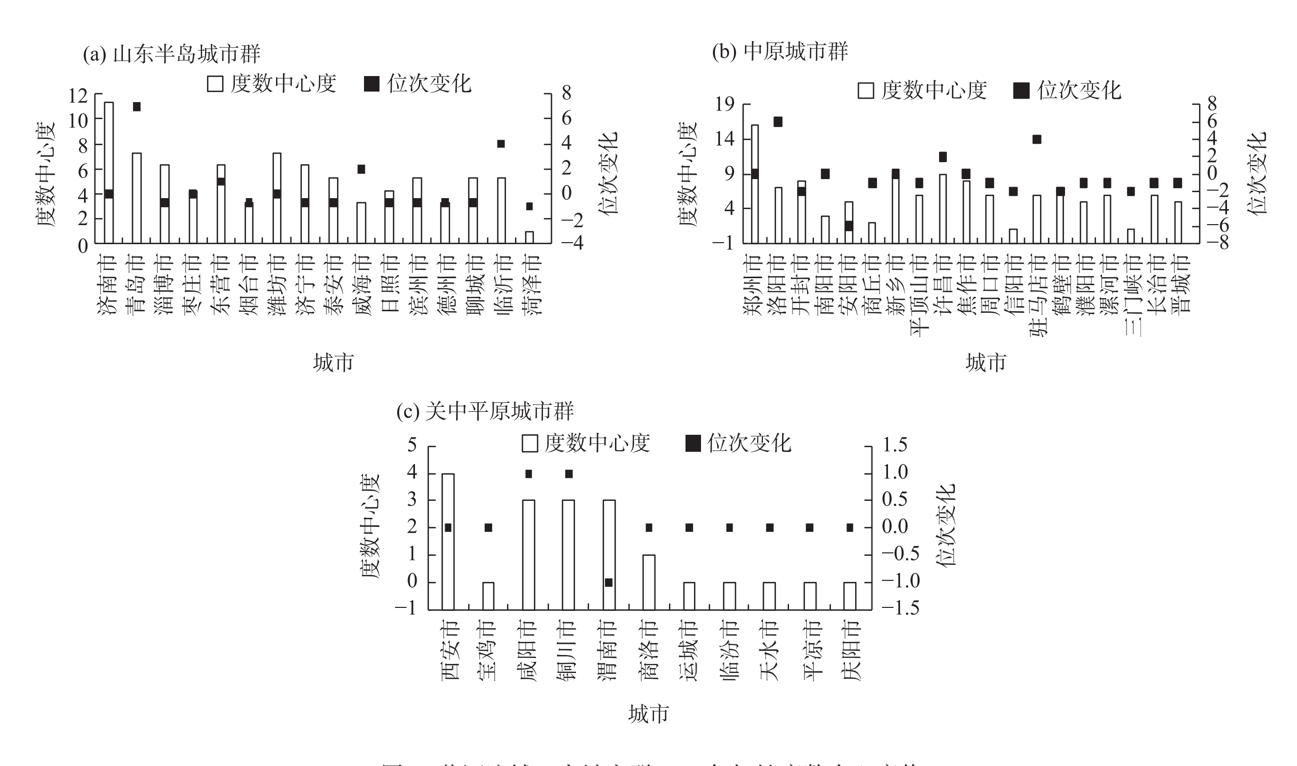


图4 黄河流域三大城市群2021年韧性度数中心度值

Fig. 4 Centrality of resilience of the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin in 2021

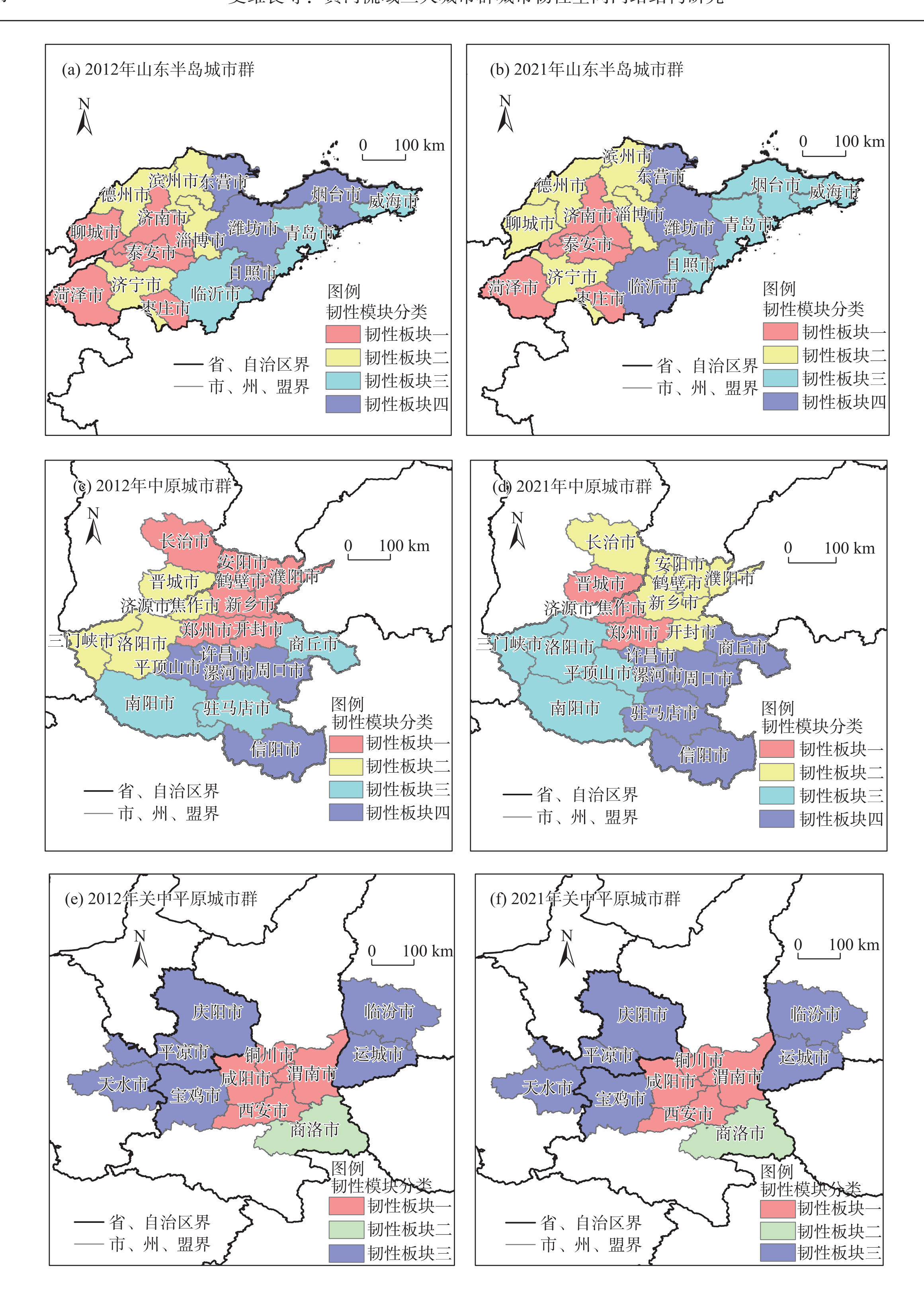


图5　黄河流域三大城市群韧性板块分类结果

Fig. 5　Classification results of resilience plates of the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin

二、以洛阳市为中心的板块三和许昌市为中心的板块四共 4 个板块。关中平原城市群形成以西安市及周边城市的板块一，商洛市为单独板块二，其余边缘城市为板块三共3个板块。

（2）三大城市群韧性网络板块关系分析

根据分类结果，利用板块密度衡量各个板块内部及板块之间的韧性关联关系，分析韧性关系关联的强弱程度，探究黄河流域三大城市群韧性网络的

均衡发展水平。

为了更加直观、简洁地展示各板块之间韧性关联关系的强弱程度，对韧性联系强度进行二值化处理，构建像矩阵。把大于整体网络密度的板块密度矩阵值赋值为1，说明对应联系较为紧密、密度较大，反之赋值为0，对应关系较为稀疏、密度较小，得到板块密度像素矩阵表，为了更加清晰地看出各个板块之间的传递机制，绘制黄河流域三大城市群韧性网络发展板块相互关系简化图(表4)。

从块模型联系矩阵和示意图可以看出，三大城市群板块内部成员的韧性关系越来越密切。具体来看，2012—2021年山东半岛城市群发展为所有板块内部密度均大于整体网络密度，其中板块三的整体密度最高且提升最快，主要是由于青岛市、烟台市等城市在网络中发挥了重要的影响力；中原城市群发展为所有板块内部的密度均大于整体网络密度，南阳市等板块三边缘地区也突破以往孤立状态，在加强与中心节点城市之间联系的同时，内部也在不断激发自身活力，努力克服发展的不对称性缺陷，有效地促进了中原城市群的整体协调发展；关中平原城市群仅有以西安市为核心的板块一密度大于整体网络密度，说明板块一内部韧性联系较强，但整体网络发展较慢。

从块模型联系矩阵和示意图可以看出，三大城市群板块成员之间关系紧密程度有紧有疏。具体来看，2012—2021年黄河流域三大城市群都存在起支撑作用的板块：山东半岛城市群板块四对其余板块起支撑作用，主要是沿海城市烟台市、青岛市等地区网络辐射作用越来越强，周边地区也更加依靠沿海城市带来的合作，从而推动区域内部韧性能力提升；中原城市群以郑州为核心的板块一对板块二和板块三起支撑作用，由于核心带动作用较强，与各个板块之间韧性资源联系较为紧密；关中平原城市群以核心城市西安市为中心的板块一在整体韧

表4 黄河流域三大城市群韧性网络密度矩阵和像矩阵

Tab. 4 Resilience network density matrix and image matrix of the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin

城市群	年份	板块	网络密度矩阵				像矩阵				韧性关联网络简化图
			板块一	板块二	板块三	板块四	板块一	板块二	板块三	板块四	
山东半岛城市群	2012	板块一	0.300	0.500	0.067	0.050	1	1	0	0	
		板块二	0.500	0.167	0.000	0.188	1	0	0	0	
		板块三	0.067	0.000	0.000	0.417	0	0	0	1	
		板块四	0.000	0.250	0.417	0.333	0	1	1	1	
	2021	板块一	0.250	0.500	0.000	0.333	1	1	0	1	
		板块二	0.500	0.250	0.000	0.200	1	1	0	0	
		板块三	0.000	0.000	0.583	0.333	0	0	1	1	
		板块四	0.083	0.267	0.250	0.333	0	1	1	1	
中原城市群	2012	板块一	0.881	0.321	0.000	0.229	1	1	0	0	
		板块二	0.321	0.667	0.000	0.050	1	1	0	0	
		板块三	0.000	0.000	0.000	0.467	0	0	0	1	
		板块四	0.229	0.050	0.467	0.500	0	0	1	1	
	2021	板块一	1.000	0.667	0.417	0.278	1	1	1	0	
		板块二	0.667	0.800	0.000	0.111	1	1	0	0	
		板块三	0.417	0.000	0.583	0.167	1	0	1	0	
		板块四	0.333	0.111	0.167	0.533	0	0	0	1	
关中平原城市群	2012	板块一	1.000	0.500	0.000	–	1	1	0	–	
		板块二	0.250	0.000	0.000	–	1	0	0	–	
		板块三	0.000	0.000	0.000	–	0	0	0	–	
	2021	板块一	1.000	0.250	0.000	–	1	1	0	–	
		板块二	0.000	0.000	0.000	–	0	0	0	–	
		板块三	0.000	0.000	0.000	–	0	0	0	–	

性网络中参与度较高，辐射带动作用强，且与其周边城市商洛市板块二有较密切的联系。中原城市群和关中平原城市群存在孤立板块：中原城市群东南角许昌市、漯河市等城市的板块四和关中平原城市群处于边缘城市的庆阳市、临汾市的板块三，这些板块由于与其他板块之间的韧性联系数量较少、板块间网络密度较小，属于活跃度低的韧性节点，对整体韧性网络建设的贡献较低。

总体来看，黄河流域三大城市群其各个板块内部逐渐形成紧密的集聚性网络团体，在一定程度上提升了其城市群整体面对风险时的抵御恢复能力；从三大城市群之间的关联来看，形成了联系紧密的集聚性网络板块，这可以在面对风险时，有效促使区域内资源的整合效率快速提升，发挥不同城市间的分工与互补协作机制，提高城市整体风险防范能力，但处于边缘板块的城市，在重大风险冲击下的自我应对能力较差，也因板块之间存在的交流隔阂而难以从核心板块获取各种资源要素，从而导致网络整体上缺乏有效应对外部干扰的能力。

4 结 论

（1）黄河流域三大城市群内各城市韧性水平逐年增强，但区域发展不平衡问题显著。各城市韧性水平具有显著的地域性，在空间上总体呈现“东高西低、南高北低”的格局。

（2）截止到2021年，黄河流域三大城市群韧性网络已形成典型的空间网络分布格局。从黄河流域三大城市群韧性联系总量来看，各个城市群韧性联系总量逐年增加，网络联系日益密切。其中山东半岛城市群形成以省会济南市为中心出发点，以沿海城市青岛市、烟台市为次级中心点辐射带动整个城市群的“一主二副”韧性空间网络格局；中原城市群形成以郑州为中心，外围的开封市、洛阳市等城市为次级中心点的“放射状”韧性空间网络格局；关中平原城市群韧性联系密切区域主要呈现以省会西安市和咸阳市相连接的“双核”韧性空间网络格局。

（3）黄河流域三大城市群核心城市的辐射效应突出，子群间的发展呈现不平衡状态。从个体网络来看，以各个省份的省会城市为中心城市，如济南市、郑州市、西安市等城市度数中心度大于各个城市群的平均值，表现为较强的带动辐射作用，离中心城市较远的城市为边缘城市，辐射带动作用较弱。从整体网络特征来看，韧性联系总量呈现缓慢增长趋势，三大城市群内部各地市间的韧性联系日趋紧密，网络密度增高，但各城市群内部城市的韧性协同发展仍具有较大的提升空间。

5 建 议

黄河流域的三大城市群即山东半岛、中原和关中平原城市群在韧性联系方面展现出显著的增长趋势。然而，尽管中心城市在各自城市群中占据优势地位，但对边缘城市的带动作用却相对有限，城市群内部的韧性协同发展尚存在较大的提升空间。为了进一步提升黄河流域城市群的城市韧性网络水平，应侧重于缩小城市间的差异，降低极化效应，需构建“多点互动、以点带线、以线带面、线面联动”的韧性发展格局。

济南市和青岛市作为山东半岛城市群的两大核心，需进一步增强其“双核”功能，推动济南市、青岛市一体化发展，构建韧性发展圈。同时，强化淄博市、潍坊市等城市的支撑作用，通过交通、信息等基础设施的互联互通，构建紧密的产业链与创新链，将加强临沂市-潍坊市-淄博市-泰安市韧性发展，通过“桥梁”式的合作，共同分担“双核”的城市职能，实现区域整体的韧性协调发展。

中原城市群应以郑州市为核心，应依托其“米”字型立体交通网的优势，通过现代产业和城镇密集区的快速建设，推动各轴线上的二级节点城市的韧性发展，如邯郸市、商丘市、周口市和洛阳市等城市，增强其抵抗风险的能力。此外，中原城市群还需在防灾减灾方面加大投入，构建“海绵城市”，提升整个区域的综合恢复能力，确保城市群韧性的可持续发展。

西安市作为关中平原城市群及“一带一路”的重要节点城市，应充分利用其独特的区位优势，积极开展对外经济技术合作，建立自贸区，进一步增强对周边城市的辐射带动作用。同时，通过政策引导、资源配置优化和创新协作等方式，培育宝鸡市、渭南市等次级中心城市，减轻西安市核心城市的压力。这将有助于形成多层级、高效协同的城市群韧性网络，确保关中城市群韧性网络的平稳运行。

参考文献(References)

[1] Alberti M. The effects of urban patterns on ecosystem function[J]. International Regional Science Review, 2005, 28(2): 168-192.

[2] Cutter S L, Barnes L, Berry M, et al. A place based model for understanding community resilience to natural disasters[J]. Global Environmental Change, 2008(18): 598-606.

[3] 范玲, 闫绪娴, 王俊丽, 等. 韧性城市建设的国际经验、中国困境与应对策略[J]. 城市问题, 2022, 323(6): 95-103. [Fan Ling, Yan Xuxian, Wang Junli, et al. International experience of resilient city construction, China's dilemma and coping strategies[J]. Urban Problem, 2022, 323(6): 95-103.]

[4] 刘彦平. 城市韧性系统发展测度——基于中国288个城市的实证研究[J]. 城市发展研究, 2021, 28(6): 93-100. [Liu Yanping. Urban resilience system development measurement: Based on an empirical study of 288 Chinese cities[J]. Urban Development Studies, 2021, 28(6): 93-100.]

[5] 赵瑞东, 方创琳, 刘海猛. 城市韧性研究进展与展望[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1717-1731. [Zhao Ruidong, Fang Chuanglin, Liu Haimeng. Progress and prospect of urban resilience research[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1717-1731.]

[6] 白立敏, 修春亮, 冯兴华, 等. 中国城市韧性综合评估及其时空分异特征[J]. 世界地理研究, 2019, 28(6): 77-87. [Bai Limin, Xiu Chunliang, Feng Xinghua, et al. A comprehensive assessment of urban resilience and its spatial differentiation in China[J]. World Regional Studies, 2019, 28(6): 77-87.]

[7] Joerin J, Shaw R, Takeuchi Y, et al. Action oriented resilience assessment of communities in Chennai, India[J]. Environmental Hazards, 2012, 11(3): 226-241.

[8] 张振, 张以晨, 张继权, 等. 基于熵权法和TOPSIS模型的城市韧性评估: 以长春市为例[J]. 灾害学, 2023, 38(1): 213-219. [Zhang Zhen, Zhang Yichen, Zhang Jiquan, et al. Urban resilience assessment based on entropy weight method and TOPSIS model: Take Changchun City as an example[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(1): 213-219.]

[9] 朱金鹤, 孙红雪. 中国三大城市群城市韧性时空演进与影响因素研究[J]. 软科学, 2020, 34(2): 72-79. [Zhu Jinhe, Sun Hongxue. Study on spatial-temporal evolution and influencing factors of urban resilience of China's three metropolitan agglomerations[J]. Soft Science, 2020, 34(2): 72-79.]

[10] Wilda Sky A. Searching for safety[M]. New Brunswick N J: Transaction, 1991: 25-29.

[11] Godschalk D R. Urban hazard mitigation: Creating resilience cities [J]. Natural Hazards, 2003(4): 136-143.

[12] 缪惠全, 王乃玉, 汪英俊, 等. 基于灾后恢复过程解析的城市韧性评价体系[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(1): 10-27. [Miao Huiquan, Wang Naiyu, Wang Yingjun, et al. An urban resilience measurement system based on decomposing post-disaster recovery process[J]. Journal of Natural Disasters, 2021, 30(1): 10-27.]

[13] 朱诗尧. 城市抗涝韧性的度量与提升策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2021. [Zhu Shiyao. Evauation and impmprovement starovement strategy of urban flood resilience[D]. Nanjing: Southeast University, 2021.]

[14] 尹建军, 胡静, 黄宇瑄. 长江中游城市群城市韧性时空演化特征及动态预测研究[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(11): 2312-2325. [Yin Jianjun, Hu Jing, Huang Yuxuan. Spatial-temporal evolution characteristics and dynamic prediction of urban resilience in urban agglomerations in middle reaches of Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32 (11): 2312-2325.]

[15] 王彩丽, 闫绪娴. 成渝城市群城市韧性时空格局演变及障碍因子识别[J]. 重庆大学学报(社会科学版), 2023, 29(3): 21-33. [Wang Caili, Yan Xuxian. Spatiotemporal revolution and obstacles identification of urban resilience in Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. Journal of Chongqing University (Social Science Edition), 2023, 29(3): 21-33.]

[16] 石宇. 京津冀城市群韧性资源网络结构特征与影响因素研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2022. [Shi Yu. Research on the structural characteristics and influencing factors of resilience resources network of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2022.]

[17] 王逸舟, 王海军, 张彬, 等. 基于多维要素流视角的城市群网络结构及影响因素分析——以武汉城市圈为例[J]. 经济地理, 2021, 41(6): 68-76. [Wang Yizhou, Wang Haijun, Zhang Bin, et al. Analysis on the network structure of urban agglomeration and its influencing factors based on the perspective of multi-dimensional feature flow: Taking Wuhan urban agglomeration as an example[J]. Economic Geography, 2021, 41(6): 68-76.]

[18] 鲍进剑, 梁娟珠, 周玉科, 等. 多元交通流视角下长江经济带城市网络空间组织模式分析[J]. 地理与地理信息科学, 2023, 39 (2): 46-54, 143. [Bao Jinjian, Liang Juanzhu, Zhou Yuke, et al. Spatial organization pattern of urban network in the Yangtze River economic belt from the perspective of multiple traffic flows[J]. Geography and Geo-Information Science, 2023, 39(2): 46-54, 143.]

[19] 吴思雨. 流空间视角下的长江中游城市群网络结构研究[D]. 南昌: 江西师范大学, 2021. [Wu Siyu. Research on the network structure of the city groups in the middle reaches of the Yangtze River from the perspective of flow space[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2021.]

[20] 李硕硕, 刘耀彬, 骆康. 生态安全约束下环鄱阳湖区城市经济韧性的空间关联网络特征[J]. 生态经济, 2023, 39(4): 95-102. [Li Shuoshuo, Liu Yaobin, Luo Kang. Spatial correlation network characteristics of urban economic resilience in Poyang Lake re-

gion under the ecological security constraints[J]. Ecological Economy, 2023, 39(4): 95-102.]

[21] 李艳, 孙阳, 陈雯. 反身性视角下信息流空间建构与网络韧性分析: 以长三角百度用户热点搜索为例[J]. 中国科学院大学学报, 2021, 38(1): 62-72. [Li Yan, Sun Yang, Chen Wen. Construction of space of information flows and assessment of network resilience from reflexive perspective: A case study of Baidu index in Yangtze River Delta[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2021, 38(1): 62-72.]

[22] 谢永顺, 王成金, 韩增林, 等. 哈大城市带网络结构韧性演化研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1619-1631. [Xie Yongshun, Wang Chengjin, Han Zenglin, et al. Structural resilience evolution of multiple urban networks in the Harbin-Dalian urban belt[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1619-1631.]

[23] 周成, 赵亚玲, 张旭红, 等. 黄河流域城市生态韧性与效率时空演化特征及协调发展分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(9): 1514-1523. [Zhou Cheng, Zhao Yaling, Zhang Xuhong, et al. Spatiotemporal evolutionary characteristics and coordinated development of urban ecological resilience and efficiency in the Yellow River Basin[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(9): 1514-1523.]

[24] 杨秀平, 王里克, 李亚兵, 等. 韧性城市研究综述与展望[J]. 地理与地理信息科学, 2021, 37(6): 78-84. [Yang Xiuping, Wang Like, Li Yabing, et al. Review and prospects of resilient city theory [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021, 37(6): 78-84.]

[25] 韩自强, 刘杰, 田万方. 城市韧性的测量指标: 基于国际文献的系统综述[J]. 广州大学学报(社会科学版), 2022, 21(6): 131-144. [Han Ziqiang, Liu Jie, Tian Wanfang. Measurements of urban resilience: A systematic review of international literature[J]. Journal of Guangzhou University (Social Science Edition), 2022, 21(6): 131-144.]

[26] 焦柳丹, 邓佳丽, 吴雅, 等. 基于PSR+云模型的城市韧性水平评价研究[J]. 生态经济, 2022, 38(5): 114-120. [Jiao Liudan, Deng Jiali, Wu Ya, et al. Evaluation of urban resilience based on PSR+ cloud model[J]. Ecological Economy, 2022, 38(5): 114-120.]

[27] 王国萍, 闵庆文, 丁陆彬, 等. 基于PSR模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建[J]. 生态学报, 2019, 39(22): 8232-8244. [Wang Guoping, Min Qingwen, Ding Lubin, et al. Comprehensive disaster risk assessment index system for national parks based on the PSR model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): 8232-8244.]

[28] 宁静, 朱冉, 张馨元, 等. 内蒙古区县城市韧性评价与分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1217-1226. [Ning Jing, Zhu Ran, Zhang Xinyuan, et al. Evaluation and analysis of urban resilience of districts and counties in Inner Mongolia[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1217-1226.]

[29] 杨桐彬, 朱英明, 姚启峰. 中国城市群经济韧性的地区差异、分布动态与空间收敛[J]. 统计与信息论坛, 2022, 37(7): 45-60. [Yang Tongbin, Zhu Yingming, Yao Qifeng. Regional differences, distribution dynamics and spatial convergence of economic resilience in Chinese urban agglomerations[J]. Journal of Statistics and Information, 2022, 37(7): 45-60.]

Resilience spatial network structure of the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin

SHI Weiliang, LI Boya,
(Xi'an University of Finance and Economics School of Statistics, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: In the context of complex risks and regional synergy, exploring a multi-center, multi-level, and multi-node resilience spatial network structure for the resilience building, risk prevention, and sustainable development of urban agglomerations holds significant practical value. This study applies social network theory and uses the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin as a case study. The modified gravity model calculates the spatial correlations of urban resilience development, and based on this, social network analysis is employed to evaluate the structural characteristics of the resilience spatial association network in these urban agglomerations. The findings reveal the following: (1) The resilience level of the three major urban agglomerations in the Yellow River Basin is trending upward, with increasing intensity in network connections, indicating that the overall resilience network is becoming more robust and integrated. (2) The spatial connectivity of resilience among the urban agglomerations is tightening, with provincial capitals demonstrating a strong radiation effect and holding dominant positions, although development among sub-agglomerations remains uneven. A typical network-type spatial pattern has emerged, where the Shandong Peninsula urban agglomeration forms a resilient spatial network characterized by "one main and two subordinate" centers, with Jinan City as the central node and Qingdao City and Yantai City as secondary centers. The Central Plains urban agglomeration forms a "radial" resilient spatial network with Zhengzhou City as the center and Kaifeng City, Luoyang City, and other cities as secondary centers. The Guanzhong Plain urban agglomeration shows a closely interconnected resilience network, presenting a "dual-core" spatial pattern linked by the provincial capitals of Xi'an City and Xianyang City.

Key words: urban resilience; spatial network structure; gravitational modeling; social network analysis